

# Nd:YAG 펄스 레이저를 이용한 AZ31B 마그네슘 합금의 겹치기 용접에서 발생하는 용접결함과 그 대책에 대한 연구

김종도\*<sup>†</sup> · 이정한\*\* · 김영식\*\*\*

\*한국해양대학교 기관공학부

\*\*한국해양대학교 대학원

\*\*\*한국과학기술정보연구원 ReSEAT 전문연구위원

## A Study on Weld Defect and Their Alternatives during Lap Welding of AZ31B Magnesium Alloy by Pulsed Nd: YAG Laser

Jong-Do Kim\*<sup>†</sup>, Jung-Han Lee\*\* and Young-Sik Kim\*\*\*

\*Division of Marine Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\*Graduate school, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\*\*KISTI ReSEAT Researcher, Busan 606-791, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : jdkim@hhu.ac.kr

(Received April 12, 2011 ; Revised May 23, 2011 ; Accepted June 27, 2011)

### Abstract

With a tendency for the application of thin magnesium alloy plates in portable electronic equipment such as cell phone and notebook PC, there is a requirement to develop a welding technology for the lap welding of these thin magnesium alloy. This paper presents the single pulsed laser welding of AZ31B magnesium alloy. The effects of fiber types and parameters such as peak power and pulse width on laser weldability were investigated. The results show that weld defects, especially solidification crack, were always generated in the weld. These defects couldn't be controlled by the simple square pulse, but could be improved through the application of variable pulse. It is because that variable pulse has effect of solidification delay by dropping peak power gradually.

Key Words : AZ31B magnesium alloy, Pulsed Nd:YAG laser, Lap welding, Weld defects, Pulse control

### 1. 서 론

전세계적으로 지구 온난화가 인류 생존에 직접적인 영향을 미치며 최우선적으로 해결해야 할 사안 중 하나라는 공통된 인식이 형성되면서, 다양한 대안이 가시화되고 있다. 더욱이 가용 에너지의 대부분을 수입하며 제조업이 국가의 기반산업인 우리나라는 향후 온실가스 감축 의무가 부과될 경우, 그로 인한 경제적 부담감은 상상을 초월할 것이다. 따라서 다양한 분야에서 녹색성장을 정책적으로 추진하고 있다.

마그네슘의 비중은  $1.74\text{g}/\text{cm}^3$ 으로, 이는 알루미늄의 2/3, 철의 1/5 수준이며 현재까지 개발된 구조용 금속 재료 중 가장 가벼운 소재이면서도 비강도가 높고 재활용이 용이하다. 더욱이 지각에 여덟 번째로 풍부한 원소이며, 해수의 약 0.13%가 마그네슘으로 구성되어 있다는 점에서 자원의 공급이 무한하다고 볼 수 있다<sup>1-4)</sup>.

반면 기존의 마그네슘은 제조과정상 육불화황(SF<sub>6</sub>)을 보호가스로 사용하면서, 친환경 소재로 분류되지는 못하였다. 육불화황은 이산화탄소에 비해 지구온난화지수(GWP: Global Warming Potential)가 약 2만 4000배에 달하는 온실가스이다. 이는 가격 경쟁력과

더불어 마그네슘 합금이 극복해야할 가장 큰 문제점이 었다<sup>5-6)</sup>.

그러나 국내 연구진에 의해서 CaO를 첨가하여 SF<sub>6</sub>를 배제한 예코 마그네슘이 지난해 개발에 성공한데 이어, 올해 말 양산에 들어가게 됨으로써 마그네슘 합금은 녹색성장을 위한 최적의 재료로 부각되고 있다<sup>7-8)</sup>.

향후 스마트폰, 태블릿, PC내장 부품소재로 각광을 받을 전망이며, 작년 기준 354만대인 국내 전체 휴대폰 생산량의 10%가 예코 마그네슘으로 대체될 경우 연간 12만 8000t 규모의 이산화탄소 감축 효과가 있다고 보고되고 있다. 더불어 이웃 일본에서는 상온 성형이 가능한 마그네슘 합금 압연판재의 개발에 성공하였다고 발표하였다.

이처럼 마그네슘 소재에 대한 연구는 상당부분 완성 단계에 도달하고 있다는 느낌이며, 이 부분에서 우리나라가 선구적인 역할을 하고 있다는 점은 괄목할 만하다. 그러나 이들 마그네슘을 활용하기 위한 가공기술, 특히 용접에 대한 연구는 아직까지 많이 미진한 실정이다.

더불어 마그네슘 합금의 용접에 관한 기존의 연구는 차체 적용을 위해 연속 열원을 이용한 경우가 대부분으로, 전자제품에 적합한 펄스 레이저를 이용한 단 펄스 용접연구는 국내는 물론 국외에서도 그 사례를 찾아보기가 어렵다<sup>9-16)</sup>. 반면에 기존에 전자제품의 케이스로 한정되어 있던 마그네슘 합금의 적용 범위를 보다 확대하기 위해서는 케이스와 브래킷의 접합처럼, 접합공정이 필수적으로 요구된다.

따라서 본 연구에서는 펄스 Nd:YAG 레이저를 사용하여 마그네슘 합금의 단 펄스(single pulse) 용접성을 조사하였으며, 용접결합의 발생 상황과 그 대책을 제시하고자 하였다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료

본 연구에서 용접재료로 선정한 마그네슘 합금은 압연판재로 상용화되어 있는 AZ31B 합금으로, 시험편의 두께는 0.6mm이다. AZ31B는 알루미늄과 아연이 각각 3wt.% 및 1wt.% 함유되어 있으며, 그 화학적 조성을 Table 1에 나타낸다.

**Table 1** Chemical compositions of AZ31B (wt.%)

Element Material	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Ni	Cu	Mg
AZ31B	3.01	0.98	0.32	0.029	0.0022	0.0012	0.0019	Bal.

### 2.2 실험방법

본 연구에서 사용한 용접열원은 램프 여기방식으로 평균출력 600W의 Pulsed Nd:YAG 레이저이다. 집광 광학계의 초점길이는 76mm이며, 노즐 끝단에서 시험편까지의 거리인 작동거리는 5.2mm이다.

실험은 두께 0.6mm의 시험편 두장을 겹치고 지그로 고정된 후, 단 펄스 겹치기 용접을 실시하였으며, 이때 겹침부의 간극은 두지 않았다. 또한 용접시 용융부를 보호하기 위해서는 직경 5mm의 동축노즐을 통해 Ar 가스를 10 l/min의 유량으로 공급하였다. Fig. 1에 본 연구의 용접 사진을 나타낸다.

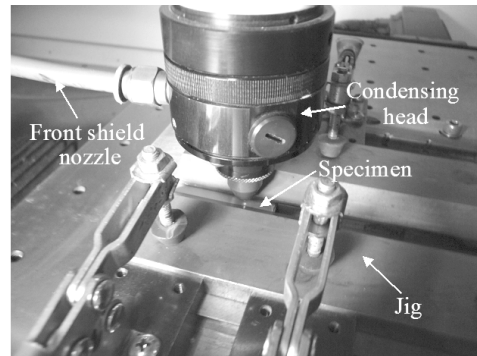
한편 겹치기 용접이 적용되는 개소는 전자제품의 케이스와 브래킷의 접합처럼, 이면이 제품의 외관이 되는 경우가 많으므로, 본 연구에서는 이를 고려하여 겹침부 이면에 영향을 미치지 않으면서 안정적으로 깊은 용입과 용접결합이 발생하지 않는 조건을 도출하는데 중점을 두었다.

용접이 완료된 시험편은 Fig. 2에 나타낸 것처럼 비드폭( $W_b$ )과 용입깊이( $D_p$ )로 그 특성을 평가하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 파이버 종류 및 비초점 거리에 따른 용입특성

박판의 용접에서는, 특히 마그네슘과 같이 비중은 낮



**Fig. 1** Dimension of experimental model

Photo Position	Bead appearance	Cross section
Measurement positions		
Name	Ⓐ Bead width ( $W_b$ )	Ⓑ Penetration depth ( $D_p$ )

**Fig. 2** Measurement positions and definitions

고 증기압은 높은 재료에서는 사소한 요인 하나하나가 용접성에 영향을 미칠 수 있다. 그 중 한 인자로 빔을 전송하는데 사용되는 파이버를 고려할 수 있는데, 본 연구에서는 파이버 종류 및 비초점 거리(defocused distance,  $f_d$ )에 따른 용입특성을 우선적으로 조사하였다.

Fig. 3은 파이버 종류에 따른 빔의 전송과정 및 출사측의 빔 프로파일을 나타낸 것이다. 두 파이버 모두 600 $\mu$ m의 직경을 가지고 있으며, 파이버 종류에 따라서 다른 빔 프로파일이 형성되는 것을 알 수 있다. 이는 코어의 굴절률 차이 때문인데, SI(step index) 파이버는 코어의 굴절률이 균일한 반면, GI(graded index) 타입은 코어의 중심축에서 클래드층으로 갈수록 굴절률이 커져 사인파와 같은 형상으로 빔이 전송된다.

Fig. 4는 GI 및 SI 파이버를 사용하였을 경우에, 광학계의 비초점 거리 변화에 따른 용입특성을 정리하여 나타낸 것이다. 이때의 용접조건은 동일시하였다. GI 파이버를 사용한 경우 레이저 용접에서 나타나는 비드 천이현상은 저입열 단 펄스 용접의 특성상 두드러지는 않았으나, 초점을 기준으로 마이너스(-) 비초점 거리에서 보다 깊은 용입이 얻어지는 것을 알 수 있다. 더불어 비초점 거리 -1.5~0mm사이에서 안정적으로 깊은 용입을 얻을 수 있었다.

다음으로 SI 파이버를 사용한 경우의 비초점거리에 따른 용입특성을 살펴보면, SI 파이버의 특성상 플랫폼(flat)한 빔이 재료에 조사되기 때문에 비초점 거리 -2~+2mm까지 유사한 용입깊이가 얻어짐을 확인할 수 있다.

동일한 용접조건하에서 초점 근방( $f_d = -1 \sim +1$ mm)에서의 파이버에 따른 용입깊이 및 비드폭을 비교해 보면, GI 파이버를 사용한 경우에는 915 및 1127 $\mu$ m, 그리고 SI 파이버를 사용한 경우에는 871 및 1212 $\mu$ m를 각각 기록하였다. 따라서 SI 파이버가 GI 파이버를 사용한 경우에 비해서 용입깊이는 낮은 반면 비드폭은 넓

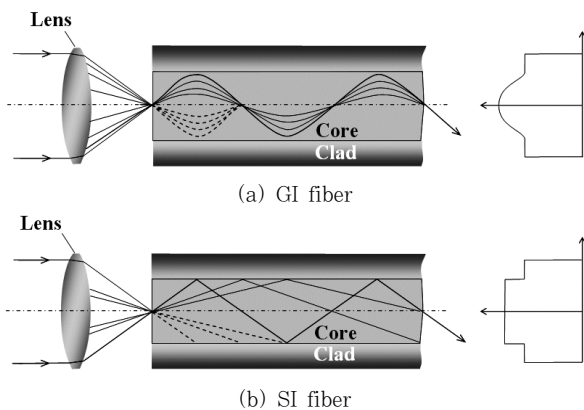
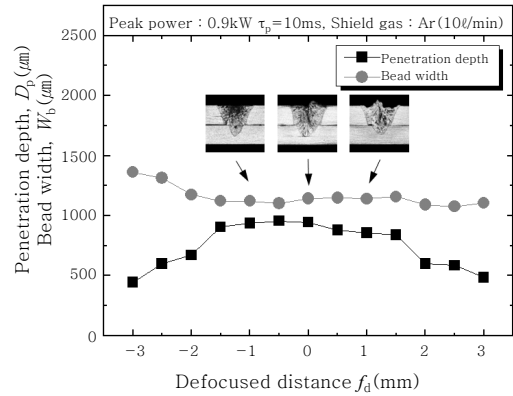
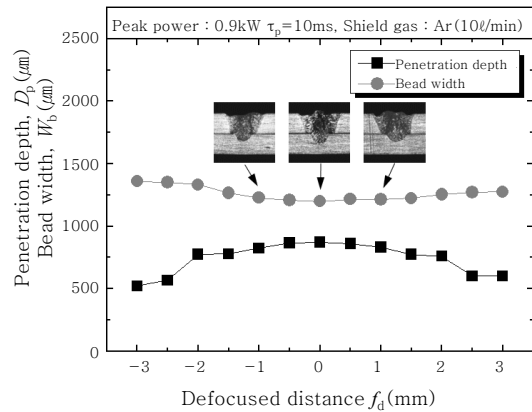


Fig. 3 Comparison between GI and SI fiber



(a) GI fiber



(b) SI fiber

Fig. 4 Penetration characteristics according to fiber type

다는 것을 알 수 있다.

마그네슘은 소재 자체가 열용량이 낮고 열전도도가 우수한 재료이기 때문에, 용접시 발생 가능한 각종 용접결함을 제어하기 위해서는 용입깊이는 다소 낮지만, 비드폭이 보다 넓은 SI 파이버의 쪽이 응고속도 제어가 보다 용이할 것으로 사료되며, 또한 접합부의 폭을 안정적으로 가져가는데도 보다 유리할 것으로 판단되므로 추후 실험은 SI 파이버를 사용하여 진행하였다.

### 3.2 용접조건에 따른 용입특성

실제 제품에 적용되는 겹치기 용접은 안정적으로 깊은 용입을 얻으면서 이면에 영향을 미치지 않는 것이 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 침투 출력( $P$ )과 펄스폭( $\tau_p$ )을 변화시켜 결함이 없으면서 깊은 용입을 얻을 수 있는 용접조건을 도출하고자 하였다. 실험은 SI 파이버를 사용하여 빔을 광학계로 전송하고 초점거리( $f_d = 0$ mm)의 조건에서 침투 출력을 1.0에서 1.5kW까지, 그리고 펄스폭을 4에서 22ms까지 변화시키면서 진행하였다. 그 결과, 용입깊이 및 비드폭의 변화를

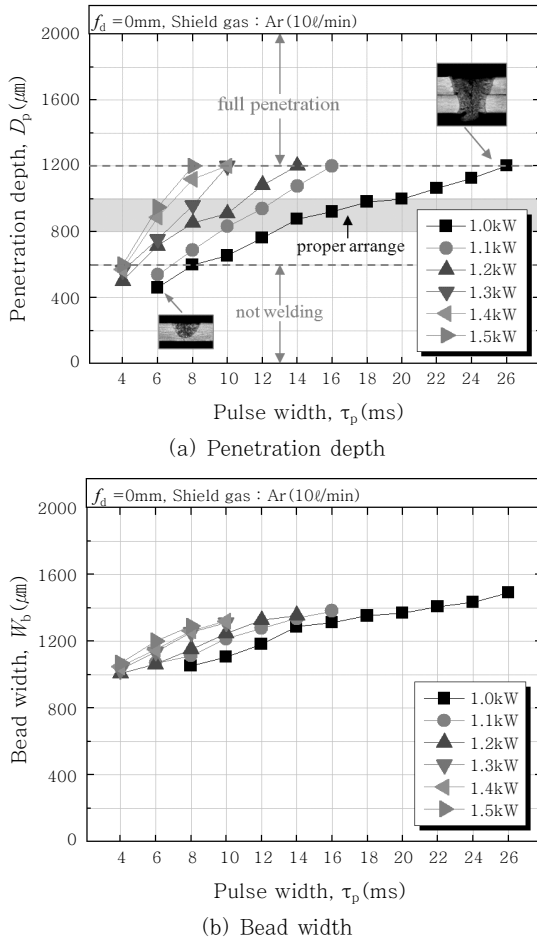


Fig. 5 Variation of penetration characteristics with peak power and pulse width

Fig. 5에 나타낸다.

첨두 출력이 증가할수록, 그리고 펄스폭이 증가할수록 용입깊이는 증가하고 있으며, 저출력일수록 보다 넓은 펄스폭 범위에서 용접이 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 첨두 출력 1.0kW, 펄스폭 22ms의 조건에서처럼 용입깊이가 1000 $\mu$ m를 넘어가면 이면비드에 열영향을 미쳤기 때문에, 본 연구를 위한 적정 용입깊이는 800에서 1000 $\mu$ m 범위로 설정하였다.

각 조건별 적정 용접조건의 범위는 첨두 출력 1.0kW를 적용한 경우에는 펄스폭 14~20ms, 1.1kW에서는 10~12ms, 1.2kW에서는 8~10ms, 1.3kW에서는 8ms, 그리고 1.4 및 1.5kW에서는 6ms의 조건이었다.

더불어 용입깊이에 미치는 각 인자의 영향을 비교해보면, 펄스폭 보다는 첨두 출력 변화에 따른 용입깊이의 변화가 현저하는 것을 확인할 수 있다. 즉 용입깊이에 결정적인 영향을 미치는 것은 파워밀도였으며, 반면 비드폭 변화에 대한 두 인자의 영향은 유사하였다.

따라서 겹치기 용접에서는 우선적으로 안정적인 용입깊이가 얻어지는 첨두출력을 선정한 후, 펄스폭을 늘려

가면서 응고시간을 제어할 필요가 있을 것으로 사료된다.

### 3.3 용접결함의 분류 및 발생 메커니즘

단순 구형과를 사용한 마그네슘 합금의 겹치기 용접에서는 Fig. 6에서 나타낸 것처럼 용접조건에 상관없이 용접부 내 균열(crack) 및 기공(porosity)과 같은 용접결함이 지속적으로 관찰되었다. 이는 급격한 열충격을 방지하기 위해 첨두 출력을 낮추거나, 또는 펄스폭을 늘려 응고시간을 확보하여도 제어할 수 없었다.

이들 용접결함이 발생하는 주된 원인은 합금원소의 첨가에 따른 균열감수성 증대와 저입열에 의한 급속응고 때문으로, 용접시 기화된 마그네슘 증기가 미처 외부로 빠져나기 전에 응고가 완료되어 용융금속내 트랩(trap)되거나, 겹침부에서 발생한 마그네슘 증기가 겹침부의 간극이 없으므로 빠져나가지 못하고 상부비드로 이동하는 중에 응고가 완료되어 이와 같은 결함을 만드는 것으로 사료된다. 더불어 열용량이 작고 열전도가 우수한 마그네슘의 고유 물성 또한 이와 같은 결함에 민감한 영향을 미치는 인자로 판단된다.

한편 일부 대형 기공이 관찰되는 경우도 있었는데, 타 조건에 비해 용입깊이가 충분치 못한 조건, 즉 이면판의 상부만이 녹은 경우에 발생하는 경향이 있었다.

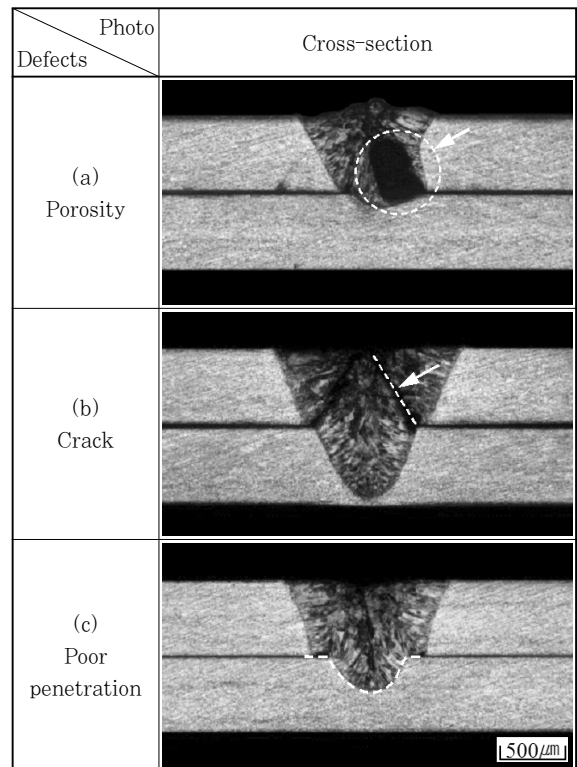


Fig. 6 Main weld defects of magnesium alloy

이는 적정조건에 비해 입열이 낮은 만큼 보다 급속응고하여 겹침부로부터 발생하는 다량의 마그네슘 증기가 외부로 빠져나가지 못하면서 용액의 함몰을 방지하기 때문으로 사료된다. 그 외 조건에서는 일부 미소 기공만이 관찰되었으며, 용접부의 건전성에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. 또한 충분한 에너지가 조사되지 못한 경우에는 겹침부 주변으로 급격히 열을 빼앗겨 T자형의 용접부 형상을 만드는 경우도 종종 관찰되었다.

따라서 마그네슘 합금의 겹침기 용접에서 발생하는 각종 용접결함을 제어하기 위해서는 합금원소의 증발 및 응고속도의 제어기술이 요구된다.

### 3.4 파형제어를 통한 용접결함의 제어

단순 구형파를 사용한 실험에서는 균열 및 기공과 같은 용접결함을 피할 수 없었으며, 기공에 비해 균열의 발생빈도가 현저히 높았다. 따라서 본 연구에서는 파형제어를 통해 이들 용접결함을 제어하고자 하였다.

우선 구형파를 사용한 단 펄스 용접에서는 높은 첨두 출력의 레이저 빔이 일순간 소재로 조사되면서 발생하는 열충격과 급격한 증발로 인해 상부비드의 함몰을 유발할 수 있다. 또한 마그네슘 산화막은 기지에 비해 용점이 매우 높으므로 동일한 조건에서도 소재로 유입되는 입열의 차이가 발생하여 용입깊이가 불안정해지는 문제점이 있었다.

이를 제어하기 위해 첨두 출력을 서서히 상승시키는 방법을 적용하였으며, 급속응고를 방지하기 위해서는 첨두출력을 서서히 낮추어 응고시간을 지연시키는 2가지 파형제어를 실현해 보았다. 그 결과, 본 실험에 사용된 파형과 그때의 비드외관 및 단면조직사진을 Fig. 7에, 그리고 그 때의 비드폭 및 용입깊이의 변화를 Fig. 8에 각각 나타낸다.

파형제어에서 참조한 용접조건은 구형파에서 적정 용입깊이가 얻어지는 조건 중 하나인 첨두 출력 1.2kW, 펄스폭 8ms로, 비교를 위해 Fig. 7내에 No.0으로 같이 제시하였다. 펄스폭 제어범위에 여유를 주기 위해서 적정조건 중 용입깊이가 다소 낮은 조건을 선정하였으며, 비초점 거리 및 실드조건은 동일시하였다.

첨두 출력을 단계적으로 높였을 시, 즉 No. 1에서 No. 4까지의 파형제어를 구현하였을 경우 용입깊이 및 비드폭이 미미하나마 증가하는 경향이 있는데, 실질적으로 재료에 조사되는 에너지가 증가하였음에도 불구하고 용입깊이에 큰 변화가 없는 것을 볼 때, 용입깊이를 결정하는 것은 첨두 출력이라는 것을 알 수 있다. 또한 단순 구형파에서 첨두 출력 1.2kW를 사용하였을 때

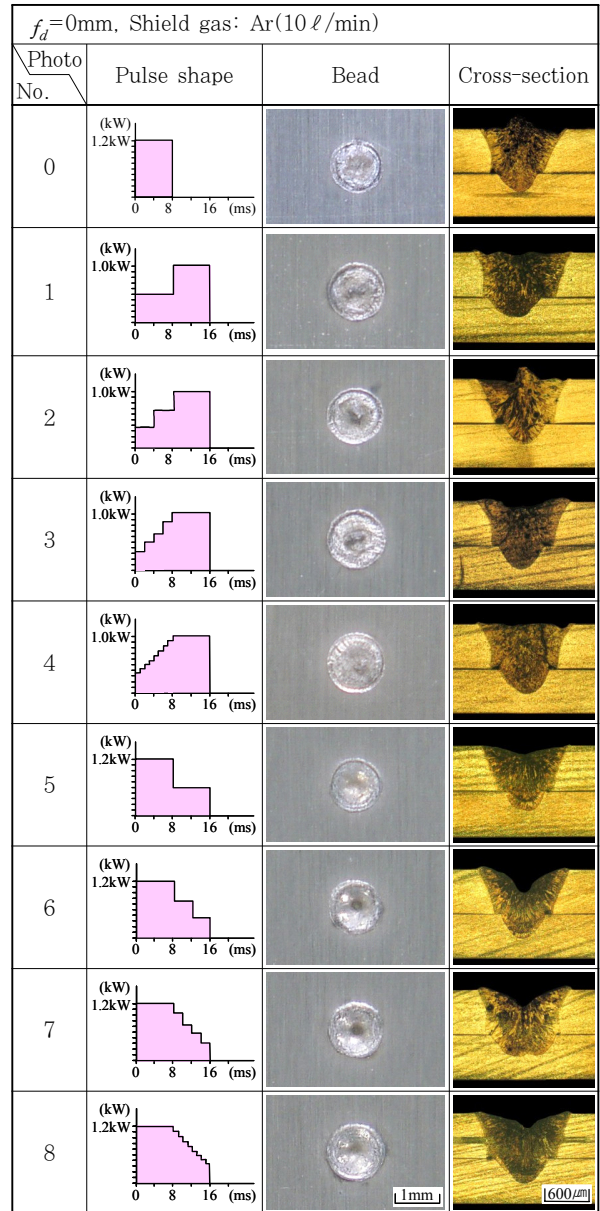


Fig. 7 Change of bead and cross section according to pulse shape

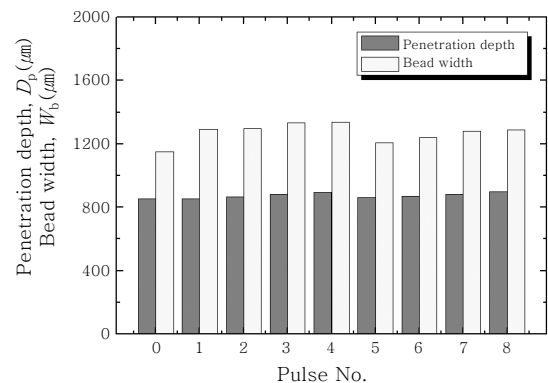


Fig. 8 Variation of weldability according to pulse shape

얻어졌던 용입깊이가 1.0kW에서 얻어지는 것은 앞선 파형들에 의한 예열효과 때문으로 사료된다. 기공의 발생은 두드러지지는 않았으나, 이와 같은 파형을 사용하여서는 겹침부로부터 크랙의 발생은 제어할 수 없었다.

한편 침두 출력을 서서히 낮추는 No. 5에서 No. 8 까지의 가변파형을 적용한 경우에는, 침두 출력의 강하 정도에 상관없이 겹침부로부터 전파되는 균열의 제어가 어느 정도 가능하였다. 특히 No. 5 파형에서 가장 건전한 용접단면이 얻어졌는데, 이는 침두 출력에 비해 낮은 출력이지만 후반 파형도 어느 정도의 펄스폭(8ms)을 가지면서 레이저 조사가 이루어져 응고시간을 확보할 수 있었기 때문으로 사료된다. 반면 강하 단계가 많은 파형에서는 비드표면의 언더필(fill) 현상이 두드러졌다. 이는 초기에 침두 출력이 용입깊이를 결정하면서 용융부를 형성하고, 이후 연이어 조사되는 파형들이 앞서 용융되었던 용융금속을 증발시켜 발생하는 현상으로 사료된다. 더불어 용접부 상부에서 균열이 관찰되는 경우도 있었다. 이는 최종적으로 조사되는 파형이 좁은 펄스폭을 가지기 때문에 비드 상부가 국부적으로 용융되었다가 급속응고하면서 균열을 만드는 것으로 사료된다.

따라서 균열을 제어하고 건전한 용접부를 얻기 위해서는 No. 5 파형에서처럼 강하 단계는 최소화하면서 충분한 펄스폭을 가지는 것이 유효하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

Nd:YAG 펄스 레이저를 이용한 AZ31B 마그네슘 합금의 겹치기 용접에서 발생하는 용접결함 제어에 관한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 파이버 종류에 따른 용접성 비교 결과, SI 파이버가 응고속도 제어 및 겹침부 폭을 안정적으로 확보하는데 보다 유리하였다.

2) 침두 출력 및 펄스폭 변화에 따른 겹치기 용접 결과, 용입깊이에 결정적인 영향을 미치는 인자는 침두 출력이었으며, 비드폭에 대한 두 인자의 영향은 유사하였다.

3) 마그네슘 합금의 단 펄스 용접에서는 용접부내 균열 및 기공과 같은 용접결함이 지속적으로 관찰되었으며, 이는 합금원소 첨가에 따른 균열감수성 증대와 저입열에 의한 급속응고가 주된 원인으로 사료된다.

4) 단순 구형파로는 이와 같은 용접결함을 제어할 수 없었으며, 파형제어를 통해 기공 및 균열의 제어가 가능하였다.

#### 후 기

이 연구는 KISTI(한국과학기술정보연구원) ReSEAT 프로그램의 심층정보분석(대학공동연구)으로 수행된 것임을 밝혀 둡니다.

#### 참 고 문 헌

1. Michael M. Avedesian and Hugh Baker : ASM Specialty Handbook-Magnesium and Magnesium Alloys, ASM, 1999, 3-12
2. X. Cao, M. Jahazi, J.P. Immarrigeon and W. Wallace : A review of laser welding techniques for magnesium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, **171-2**(2006), 188-204
3. D. Eliezer, E. Aghion and F.H. Froes : Magnesium Science, Technology and Applications, *Advanced Performance Materials*, **5-3** (1998), 201-212
4. Z. Yang, J.P. Li, J.X. Zhang, G.W. Lorimer and J. Robsonm : REVIEW ON RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MAGNESIUM ALLOYS, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, **21-5** (2008), 313-328
5. S. Ramakrishnan and P. Koltun : Global warming impact of the magnesium produced in China using the Pidgeon process, *Resources, Conservation and Recycling*, **42-1** (2004), 49-64
6. A. Tharumarajah and P. Koltun : Is there an environmental advantage of using magnesium components for light-weighting cars?, *Journal of Cleaner Production*, **15-11~12** (2007), 1007-1013
7. Jin Kyu Lee and Shae K. Kim : Development of Eco-Mg Alloy, *Journal of the Korean Foundrymen's Society*, **29-3** (2009), 101-112 (in Korean)
8. Jin kyu Lee, Seong Ho Ha, Young Jig Kim, Hyung Ho Jo and Shae K. Kim : Melt Protection Property and Ignition Resistance Property of CaO added AZ91D Mg Alloy, *Journal of the Korean Foundrymen's Society*, **27-3** (2007), 131-134 (in Korean)
9. K.H. Leong, G. Kornecki, P.G. Sanders and J.S. Keske : Laser Beam Welding of AZ31B-H24 Magnesium Alloy, *Section F-ICALEO*, 1998, 28-36
10. P. G. Sanders, J. S. Keske, K. H. Leong and G. Kornecki : High power Nd:YAG and CO<sub>2</sub> laser welding of magnesium, *Journal of Laser Applications*, **11-2** (1999), 96-103
11. Byoung Hyun Yoon and Woong Seong Chang : Welding Technology of Magnesium Alloy for Automobile Industry, *journal of KWS*, **22-3**(2004), 23-31 (in Korean)
12. Jinhong Zhu, Lin Li and Zhu Liu: CO<sub>2</sub> and Diode Laser Welding of AZ31 Magnesium Alloy, *Applied Surface Science*, **247-1/4** (2005), 300-306

13. Mok Young Lee, Chung Seon Ryu and Woong Seong Chang : Trends in Application of Magnesium Alloy and Its Welding Characteristics with Laser, journal of KWJS, **25-5** (2007), 29-35 (in Korean)
14. Jong Do Kim, Byung Lea Kil and Jung Han Lee : Effect of Process Parameters on Laser Weldability of AZ31 Magnesium Alloy, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, **32-4** (2008), 570-577 (in Korean)
15. Yajie Quan., Zhenhua Chen, Zhaohui Yu, Xiaosan Gong and Mei Li : Characteristics of laser welded wrought Mg-Al-Mn alloy, Materials Characterization, **59-12** (2008), 1799-1804
16. Jong Do Kim, Jung Han Lee and Jang Soo Kim : Characteristics of Butt Welded AZ31 Magnesium Alloy with Laser Welding Conditions, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, **33-4** (2009), 517-523 (in Korean)